



اثر هیبرید نمودن الیاف تقویت کننده بر خواص کششی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی

حسین ابراهیم‌نژاد خالجیری^۱، رضا اسلامی فارسانی^{۲*}، حمید خرسند^۲، کوشا عباس بنایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد

* تهران، صندوق پستی ۴۳۳۴۴-۱۹۹۹۱، eslami@kntu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: دی ۹۳

پذیرش: بهمن ۹۳

کلیدواژگان

الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده

اپوکسی

کامپوزیت هیبریدی

خواص کششی

الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده از پایدارسازی حرارتی الیاف پلی‌اکریلونیتریل به دست می‌آید و به عنوان ماده ی اولیه برای تولید الیاف کربن استفاده می‌شود. در این تحقیق اثر افزودن این الیاف بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با پارچه‌های سه نوع الیاف پیشرفته بررسی می‌شود. بدین منظور ۱۳ نوع کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با یکی از انواع پارچه الیاف کربن، کولار و شیشه به همراه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به روش لایه گذاری دستی به صورت چهار لایه با چیدمان‌های متفاوت ساخته شدند. برای ساخت کامپوزیت‌ها از رزین اپوکسی بیسفتول F و هاردنر پلی‌آمینی استفاده شده و نسبت رزین به الیاف ۶۰ به ۴۰ درصد وزنی انتخاب شد. سپس خواص کششی و سطح مقطع شکست کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به پارچه کربن، کولار و شیشه، استحکام کششی و مدول الاستیک کاهش یافته اما در نسبت‌های بالای ۵۰٪ وزنی میزان کرنش شکست افزایش می‌یابد. بررسی سطح مقطع شکست نشان داد که کامپوزیت‌های ساخته شده با یکی از پارچه‌های الیاف کربن، کولار و شیشه به همراه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده، به ترتیب دارای نوع شکست عرضی، انفجاری و لایه لایه شدن لبه‌ای می‌باشند و با افزایش نسبت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به پارچه‌های کربن، کولار و شیشه، نوع شکست عرضی می‌شود.

Hybridization effect of fibers reinforcement on tensile properties of epoxy composites

Hossein Ebrahimnezhad Khaljiri¹, Reza Eslami Farsani^{1*}, Hamid khorsand¹, Kosha Abbas Banaie²

1- Department of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Department of Textile Engineering, Islamic Azad University, Yazd Branch, Yazd, Iran.

* P.O.B. 1991-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Oxidized Polyacrylonitrile Fibers,
Epoxy,
Hybrid Composite,
Tensile Properties

Abstract

Oxidized Polyacrylonitrile fibers (OPF) are made by thermal stabilization of polyacrylonitrile (PAN) fibers and are used as precursors materials for production of carbon fibers. In this paper, effect of adding these fibers on tensile properties of polymer matrix composites was studied. So thirteen kind weights of epoxy matrix composite reinforced with one of the carbon, Kevlar and glass fabrics including OPF by hand lay up method as four layers with different layering were made. For making of composites epoxy Bisphenol F resin and polyamine hardener were used and the resin to fiber fraction was selected as 60 percent. Then tensile properties and failure cross section of them were studied. Results showed that by increasing OPF to carbon, Kevlar and glass fabric ratio; the tensile and modulus strength decreased but in more than 50 weight percent ratios failure strain increased. Study of the fail cross section showed that composites made with one of the carbon, Kevlar, glass fabrics including OPF have lateral, explosive and edge delamination failure modes respectively and with increasing the OPF to carbon, Kevlar and glass fabric transverse failure mode happens.

۱- مقدمه

شرکت الیاف کربن^۴ انگلیس استفاده شد [۳]. پایدارسازی حرارتی در محیط هوا و در محدوده‌ی دمایی ۳۰۰-۱۸۰ °C انجام می‌شود و در حین پایدارسازی

الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده^۱ از پایدارسازی حرارتی پلی‌اکریلونیتریل^۲ به دست می‌آید [۲،۱]. نام تجاری این الیاف پنوکس^۳ می‌باشد که ابتدا توسط

2. Polyacrylonitrile (PAN)

3. PANOX

4. R. K. Carbon Fiber

1. Oxidized Polyacrylonitrile Fibers (OPF)

Please cite this article using:

Ebrahimnezhad Khaljiri, H. Eslami Farsani, R. khorsand, H. and Abbas Banaie, K., "Hybridization effect of fibers reinforcement on tensile properties of epoxy composites" Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

مانع استفاده از آنها می شود. از طرف دیگر الیاف پلیمری، چگالی کمی دارند و داکتیل نیز هستند، اما سفتی کم و مقاومت دمایی محدودی دارند [۱۶]. الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده، نوعی الیافی پلیمری است که مقاوت دمایی بالا و کرنش شکست مناسبی دارد ولی خواص استحکامی آن کم است. با توجه به توضیحات فوق در خصوص استفاده از مزایای دو نوع الیاف در کنار هم، هدف این تحقیق امکان سنجی ساخت کامپوزیت زمینه پلیمری هیبریدی شامل الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده به همراه یکی از انواع الیاف کربن، کولار و شیشه و همچنین تاثیر هیبرید کردن بر خواص استحکام کششی، مدول الاستیک و کرنش شکست این کامپوزیت ها می باشد.

۲- بخش تجربی

۱-۲- مواد

نوع رزین استفاده شده در ساخت کامپوزیت ها، رزین اپوکسی بیسفنول F^۶ (ML-506) و هاردنر پلی آمینی^۷ نوع (HA-11) محصول شرکت مواد مهندسی مکرر می باشد. پارچه الیاف شیشه با چگالی سطحی 200 g/cm^2 و بافت ساده (۹۰/۰) محصول شرکت کام الیاف^۸ ترکیه، پارچه الیاف کربن با چگالی سطحی 200 g/cm^2 و بافت مورب^۹ 2×2 محصول جی. آنجلونی^{۱۰} ایتالیا، پارچه الیاف کولار با چگالی سطحی 175 g/cm^2 و بافت مورب 2×2 محصول شرکت کولان^{۱۱} استرالیا و الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده با چگالی خطی $1/16 \text{ dtex}$ دارای سطح مقطع گرد محصول شرکت کورتولز^{۱۲} کشور انگلستان در ساخت کامپوزیت ها استفاده شد. به دلیل عدم دسترسی به الیاف شیشه با چگالی 200 g/cm^2 و بافت مورب 2×2 در زمان ساخت کامپوزیت ها، با توجه به منابع موجود از الیاف شیشه با بافت ساده با چینش و فشردگی^{۱۳} مناسب تار و پود که خواص استحکامی معادل بافت مورب 2×2 را دارد، استفاده شد [۱۷]. بدین ترتیب خواص استحکامی کامپوزیت های ساخته شده، مستقل از نوع بافت هستند.

۲-۲- آماده سازی و ساخت کامپوزیت ها

کامپوزیت ها به صورت ۴ لایه با چیدمان های متفاوت با ابعاد $30 \times 25 \text{ cm}^2$ توسط روش لایه چینی دستی^{۱۴} ساخته شدند شکل ۱. نسبت رزین به هاردنر ۱۰۰ به ۱۵ واحد است. مدت زمان اختلاط رزین و هاردنر ۲ دقیقه می باشد. زمان پخت^{۱۵} برای این کامپوزیت ها ۲۴ ساعت در دمای محیط انتخاب شد. به دلیل جذب بالای رزین توسط الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده، نسبت رزین به الیاف ۶۰ به ۴۰ درصد وزنی انتخاب شد. برای ساخت کامپوزیت با این نسبت، ابتدا وزن الیاف با ابعاد مورد نظر توسط ترازوی دیجیتال با دقت 0.01 g اندازه گیری شده، سپس با توجه به وزن به دست آمده و نسبت ۶۰ به ۴۰ زمینه به تقویت کننده، وزن مخلوط رزین و هاردنر تعیین شد. همچنین برای حصول اطمینان از رعایت این نسبت، وزن کامپوزیت ها پس از فرآیند پخت اندازه گیری شد. دقت در این روش $\pm 2\%$ می باشد. برای کاهش حفرات در داخل کامپوزیت وزنه ۲۰ کیلوگرمی بر روی سطح قالب قرار داده

رنگ الیاف از سفید به قهوه ای و سپس سیاه تغییر می کند که به خاطر واکنش های حلقه ای شدن می باشد. پایداری حرارتی شامل واکنش های دی هیدروژنه کردن، حلقه ای شدن و اکسیداسیون می باشد که حلقه ای شدن در دماهای پایین و اکسیداسیون در دماهای بالا رخ می دهد [۱۵].

تحقیقات قبلی در مورد ترکیب شیمیایی الیاف پلی اکریلونیتریل نشان می دهد که این الیاف حاوی ۸۵٪ اکریلیک و ۱۵٪ کومونومرهای^۱ مانند ایتاکونیک اسید^۲ و متیل اکریلات^۳ می باشند. اضافه کردن متیل اکریلات باعث افزایش سرعت واکنش های پایداری می شود [۵]. اضافه کردن کومونومرهای یونی و اسیدی نظیر سدیم متالیل سولفونات^۴ و سدیم دو متیل دو اکریل آمینو پروپان سولفونات^۵ سبب افزایش استحکام کششی این الیاف می شوند [۶].

مطالعات نشان می دهد که در حین پایداری حرارتی استحکام کششی افزایش می یابد [۷]. بهبود جهت گیری کریستالی الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده باعث کاهش ساختار آمورف، کاهش حفرات و بهبود خواص استحکامی الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده می شود. کشش الیاف به صورت گسترده برای بهبود جهت گیری کریستالی استفاده می شود اما دارای محدودیت می باشد. مطالعات نشان می دهد که استفاده از میدان مغناطیسی قوی برای بهبود جهت گیری کریستالی روش مناسب تری می باشد [۸].

تحقیقات قبلی در مورد خواص مکانیکی الیاف پلی اکریلونیتریل نشان داد که با افزایش زمان پایداری، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول روندی کاهشی دارند اما مدول الاستیک در ابتدا روندی افزایشی و سپس کاهشی دارد. این کاهش در خواص مکانیکی به خاطر تبدیل شدن گروه های نیتریل به نیترو در حین پایداری می باشد. دلیل دیگر در کاهش خواص مکانیکی به خاطر اکسیداسیون بیش از حد در محدوده دمایی پایداری می باشد [۹]. همچنین با افزایش سرعت حرارت دهی تا سرعت $2 \text{ }^\circ\text{C/min}$ افزایش استحکام به سرعت رخ می دهد اما در سرعت های حرارت دهی بالاتر با شیب ملایم تری رخ می دهد [۱۰].

مطالعات نشان می دهد که واکنش های حلقه ای شدن، دی هیدروژنه شدن، اتصالات عرضی و اکسیداسیون در اتمسفر حاوی اکسیژن رخ می دهد. اما در نیتروژن خالص فقط واکنش های حلقه ای شدن و دی هیدروژنه شدن وجود دارد. در اتمسفرهای حاوی اکسیژن و نیتروژن با افزایش غلظت اکسیژن تا ۲۰٪ حجمی افزایش استحکام دیده می شود اما در غلظت های بیشتر از ۲۰٪ حجمی با افزایش غلظت اکسیژن کاهش استحکام وجود دارد [۱۱].

مهم ترین ویژگی های الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده، مقاومت حرارتی بالا، انحلال ناپذیر بودن، نقطه ذوب بالا، مقاومت الکتریکی بالا، امن از نظر بیولوژیکی و قابلیت جذب رطوبت می باشد [۱۲-۳]. وجود چنین خواصی باعث شده است تا از آن در تولید پارچه های مقاوم به آتش، پوشش های سطحی، لایه های مقاوم به آتش برای باتری ها و تولید الیاف کربن استفاده شود [۱۳-۱۵].

به طور کلی هدف از هیبرید کردن دو الیاف در کامپوزیت بدست آوردن فواید دو الیاف و کم کردن معایب می باشد. با جایگزین کردن الیاف داکتیل به جای الیاف ترد در کامپوزیت زمینه پلیمری می توان کرنش شکست را بهبود بخشید. الیاف فلزی، سفتی بالا و کرنش شکست زیادی دارند. اما چگالی زیاد

6. Resin epoxy Bisphenol F
7. Polyamine Hardener
8. Camelyaf
9. Twill weave
10. G. Angeloni
11. Colan
12. Courtaulds
13. Crimp
14. Hand Lay-Up
15. Cure

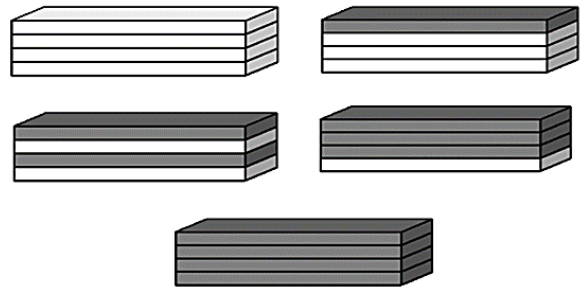
1. Comonomer
2. Itaconic Acid
3. Methyl Acrylate
4. Sodium Methallyl Sulfonate
5. Sodium 2-methyl-2-acrylamidopropane sulfonate

استاندارد در مورد استفاده از کاغذ سمباده به جای تب پلیمری اشاره شده است.



شکل ۲ نمونه های آزمون کشش با تب سمباده ای.

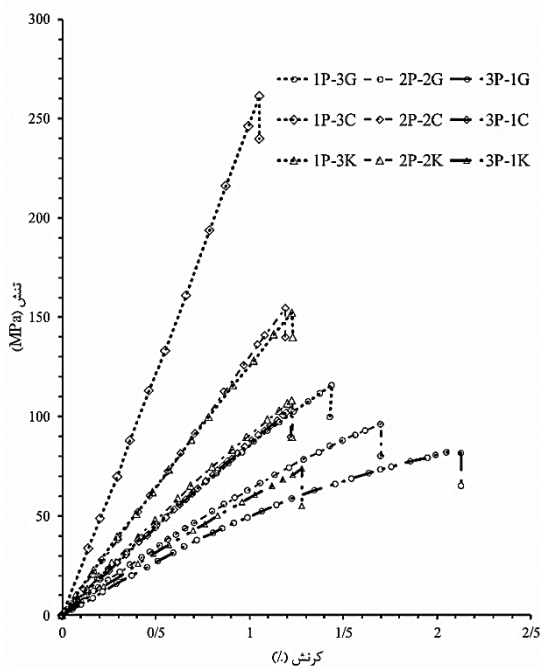
شد. کد کامپوزیت های زمینه اپوکسی، همچنین تعداد لایه های پارچه استفاده شده در کامپوزیت و نسبت تقویت کننده ها در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱ انواع چیدمان لایه ها- لایه روشن: پارچه الیاف کربن یا الیاف شیشه یا الیاف کولار، لایه تیره: الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده.

۳- نتایج و بحث

شکل ۳، نمودار تنش- کرنش کامپوزیت های هیبریدی تقویت شده با پارچه الیاف کربن، کولار و شیشه به همراه الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده را نشان می دهد. این نمودار از نمودارهای نیرو-جابجایی آزمون کشش براساس استاندارد D ۳۰۳۹ به دست آمده است.



شکل ۳ نمودار تنش- کرنش کامپوزیت های هیبریدی.

۳-۱- خواص کششی کامپوزیت حاوی الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کربن

در جدول ۲ نتایج مربوط به داده های به دست آمده در آزمون کشش شکل ۳، کامپوزیت های ساخته شده از الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده به همراه پارچه کربن با لایه گذاری های متفاوت آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده، کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه الیاف کربن با استحکام کششی $566/40 \pm 15/80$ MPa، بیشترین و کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده با استحکام کششی $61/07 \pm 6/73$ MPa، کمترین استحکام را دارا می باشند. خواص استحکامی الیاف پلی اکریلونیتریل

جدول ۱ مشخصات و کد کامپوزیت های ساخته شده

کد نمونه	تعداد لایه های پارچه تقویت کننده	نسبت الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده به کل تقویت کننده در کامپوزیت (%)
0P-4C	۴	۰
1P-3C	۳	۴۸
2P-2C	۲	۷۶
3P-1C	۱	۸۹
0P-4K	۴	۰
1P-3K	۳	۵۳
2P-2K	۲	۷۵
3P-1K	۱	۸۶
0P-4G	۴	۰
1P-3G	۳	۵۱
2P-2G	۲	۷۴
3P-1G	۱	۸۹
4P	۰	۱۰۰

P = الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده، C = پارچه کربن، K = پارچه کولار، G = پارچه شیشه

۳-۲- تجهیزات

آزمون کشش توسط دستگاه هانسفیلد^۱ H25KS با نیروی ۲۵ KN و سرعت کشش ۲ mm/min انجام شد. برای هر آزمایش براساس استاندارد D ۳۰۳۹ انجمن آزمایش مواد آمریکا^۲، تعداد پنج نمونه کامپوزیتی آزمون کشش با ابعاد $250 \times 20 \times 2$ mm^۳ (طول × عرض × ضخامت) بریده و سمباده زنی شدند. همچنین طول سنجه^۴ نیز ۱۰۰mm انتخاب شد. از کاغذ سمباده به عنوان تب^۴ استفاده شد شکل ۲. هدف از استفاده از تب پلیمری افزایش اصطکاک بین گیره و نمونه ی آزمایش و همچنین شکست در ناحیه طول سنجه در آزمون کشش می باشد. کاغذ سمباده باعث افزایش اصطکاک بین گیره و نمونه می شود. برای شکستن نمونه در طول سنجه کافی است دقت عرض نمونه را توسط سمباده زنی به زیر ۰/۳ mm رساند. همچنین در

1. Hounsfield
2. ASTM D3039
3. Gauge Length
4. Tab

چیدمان های متفاوت را نشان می دهد. داده های مربوط به استحکام کششی و مدول الاستیک رفتاری مشابه کامپوزیت های چهار لایه با چیدمان های پارچه کربن و الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده از خود نشان می دهند.

بر اساس این داده ها کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه کولار با استحکام کششی $322/44 \pm 10/01$ MPa و کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده با استحکام کششی $610/7 \pm 6/73$ MPa، به ترتیب بیشترین و کمترین استحکام کششی را دارند. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه کولار به الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده در دیگر چیدمان ها، استحکام کششی روندی افزایشی دارد.

کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه الیاف کولار با مدول الاستیک $19/60 \pm 0/90$ GPa و کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده با مدول الاستیک $4/87 \pm 0/06$ GPa، به ترتیب بیشترین و کمترین مدول الاستیک را دارند. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه الیاف کولار به الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده مدول الاستیک روندی افزایشی دارد که به علت حضور پارچه کولار و تاثیر آن بر مدول الاستیک کامپوزیت می باشد. نتایج نشان داد که حضور الیاف کولار در کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده خواص مکانیکی این کامپوزیت ها را بهبود می دهد.

با توجه به داده های جدول ۳ کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه کولار بیشترین کرنش شکست را دارد. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه کولار به الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده تا درصد وزنی 53% ، کرنش شکست روندی کاهش یافته است. اما در درصد های بالاتر از 53% ، کرنش شکست از روندی افزایشی برخوردار است. کاهش اولیه کرنش شکست به دلیل عدم تطابق بین پارچه الیاف کولار و الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده می باشد. اما با افزایش نسبت الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده به الیاف کولار کرنش شکست پهنه می شود.

اکسید شده در طی مراحل پایداری سازی به دلیل تشکیل اتصالات عرضی ضعیف در ساختار این الیاف کاهش می یابد [۱۸]. به همین دلیل کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده کمترین استحکام کششی را دارد. بنابراین برای بهبود خواص استحکامی این کامپوزیت تقویت کننده های پارچه الیاف کربن و الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده به صورت لایه لایه در کامپوزیت هیبرید شده اند. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه کربن به الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده به خاطر خواص استحکامی پارچه الیاف کربن، استحکام کششی کامپوزیت ها بیشتر می شود.

با توجه به جدول ۲، کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه کربن کرنش شکست $1/3\%$ را نشان می دهد. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه کربن به الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده تا درصد وزنی 48% ، کرنش شکست روندی کاهش یافته و بعد از آن روندی افزایشی را از خود نشان می دهد. بیشترین کرنش شکست را کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده با کرنش شکست $1/68\%$ دارد. در حین پایداری در داخل الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده ساختار پلیمری نزدیکی تشکیل می شود که این ساختار باعث افزایش درصد از یاد طول الیاف به مقدار زیاد می شود. به همین دلیل کامپوزیت تقویت شده با چهار لایه الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده بیشترین کرنش شکست را دارد. کاهش اولیه کرنش شکست در کامپوزیت ها تا 48% وزنی حاوی الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده عدم تطابق بین پارچه الیاف کربن و الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده می باشد. نتایج این کامپوزیت ها نشان می دهد که حضور الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده کرنش شکست را در کامپوزیت های تقویت شده با پارچه الیاف کربن را افزایش می دهد. با توجه به این نتایج می توان نتیجه گرفت که هیبرید کردن الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده با پارچه الیاف کربن تردی کامپوزیت های تقویت شده با الیاف کربن را کاهش و داکتیلیتی را افزایش می دهد.

جدول ۲ نتایج آزمون کشش کامپوزیت با چیدمان های متفاوت الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کربن

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	کرنش شکست (%)
0P-4C	$566/40 \pm 15/80$	$42/45 \pm 0/48$	$1/30 \pm 0/03$
1P-3C	$261/38 \pm 12/30$	$25/00 \pm 0/60$	$1/05 \pm 0/01$
2P-2C	$154/54 \pm 8/09$	$12/69 \pm 0/40$	$1/19 \pm 0/04$
3P-1C	$103/11 \pm 2/70$	$8/86 \pm 0/20$	$1/22 \pm 0/05$
4P	$610/7 \pm 6/73$	$4/87 \pm 0/06$	$1/68 \pm 0/04$

جدول ۳ نتایج آزمون کشش کامپوزیت با چیدمان های متفاوت الیاف

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	کرنش شکست (%)
0P-4K	$322/44 \pm 10/01$	$19/60 \pm 0/90$	$1/75 \pm 0/06$
1P-3K	$152/37 \pm 8/51$	$11/86 \pm 0/56$	$1/22 \pm 0/03$
2P-2K	$108/03 \pm 8/32$	$8/74 \pm 0/36$	$1/23 \pm 0/06$
3P-1K	$73/69 \pm 3/63$	$6/41 \pm 0/27$	$1/28 \pm 0/03$
4P	$610/7 \pm 6/73$	$4/87 \pm 0/06$	$1/68 \pm 0/04$

۳-۳- خواص کششی کامپوزیت حاوی الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه

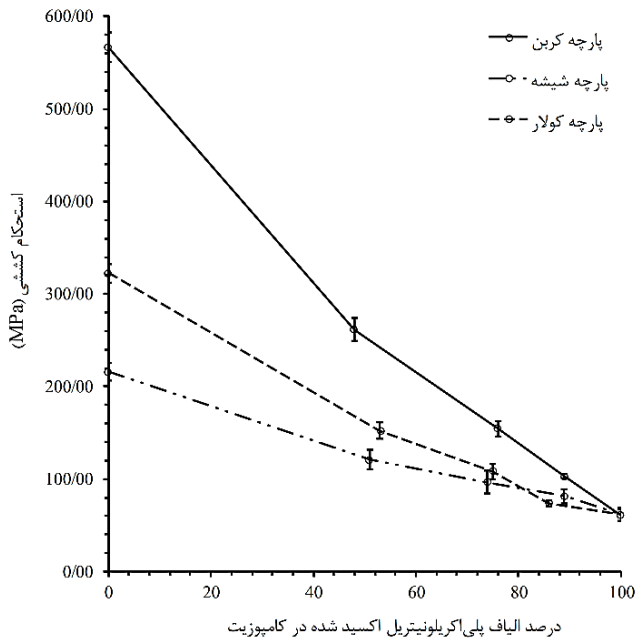
جدول ۴ نتایج مربوط به آزمون کشش کامپوزیت های چهار لایه تقویت شده با الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه با چیدمان های متفاوت را نشان می دهد. پارچه شیشه نیز مانند پارچه کولار و کربن باعث بهبود استحکام کششی و مدول الاستیک کامپوزیت های چهار لایه با چیدمان های متفاوت الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه می شود. در این حالت، کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه شیشه با استحکام کششی $215/91 \pm 9/65$ MPa و کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده با استحکام کششی $610/7 \pm 6/73$ MPa، به

مدول الاستیک کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه الیاف کربن، $42/45 \pm 0/48$ GPa و کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده، $4/87 \pm 0/06$ GPa است که به ترتیب، بیشترین و کمترین مدول نسبت به دیگر لایه گذاری ها دارند. مدول الاستیک الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده رفتاری مشابه استحکام کششی این الیاف دارد [۱۸]. به همین دلیل با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه کربن به الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده در کامپوزیت، مدول الاستیک روندی افزایشی دارد.

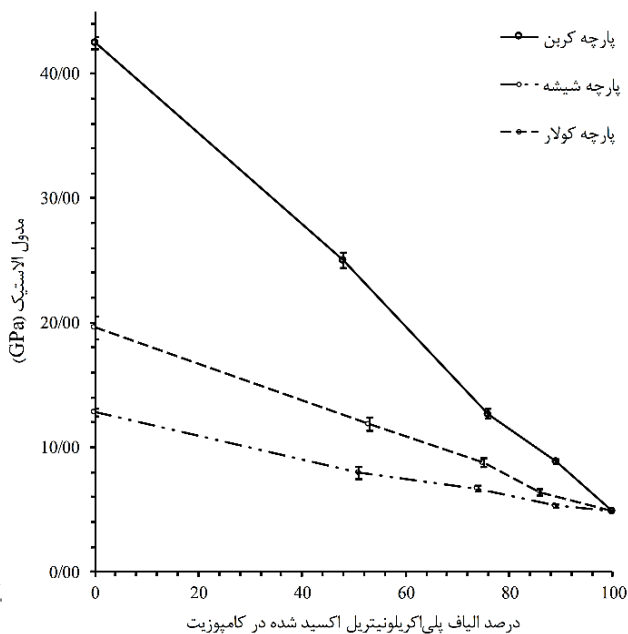
۳-۲- خواص کششی کامپوزیت حاوی الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کولار

جدول ۳ نتایج مربوط به آزمون کشش شکل ۳، کامپوزیت های چهار لایه تقویت شده با پارچه الیاف کولار و الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده با

منطقه شکست در جدول ۵ آمده است [۱۹-۲۰]. براساس جدول ۵، نتایج حالت شکست برای کامپوزیت‌های ساخته شده از پارچه‌های کربن، کولار و شیشه به همراه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به صورت خلاصه و به ترتیب در جداول ۶ تا ۸ آورده شده است.



شکل ۴ تغییرات استحکام کششی برحسب درصد الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به کل الیاف تقویت کننده در کامپوزیت.



شکل ۵ تغییرات مدول الاستیک برحسب درصد الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به کل الیاف تقویت کننده در کامپوزیت.

ترتیب بیشترین و کمترین استحکام کششی را دارا می‌باشند. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه شیشه به الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده استحکام کششی روندی افزایشی دارد.

کامپوزیت با چیدمان ۴ لایه پارچه شیشه با مدول الاستیک $12/80 \text{ GPa}$ و کامپوزیت با چیدمان ۴ لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با مدول الاستیک $4/87 \text{ GPa}$ ، به ترتیب بیشترین و کمترین مدول الاستیک را دارند. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه شیشه به الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده، مدول الاستیک روندی افزایشی دارد.

با توجه به داده‌های به دست آمده، میزان کرنش شکست کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه شیشه بیشتر از کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت درصد وزنی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به پارچه شیشه تا نسبت 51% ، کرنش شکست روندی کاهشی دارد و بعد از نسبت وزنی 51% روندی افزایشی دارد که این کاهش کرنش به خاطر تفاوت در نوع بافت پارچه و الیاف و عدم یکنواختی کامپوزیت می‌باشد. در چیدمان‌های دیگر این عدم یکنواختی کمتر شده و باعث افزایش میزان کرنش شده است. بیشترین میزان کرنش شکست در نسبت وزنی 89% به دست آمده است. با توجه به نتایج کرنش شکست می‌توان نتیجه گرفت هیبرید کردن الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با پارچه الیاف شیشه، داکتیلیتی کامپوزیت را افزایش می‌دهد.

جدول ۴ نتایج آزمون کشش کامپوزیت با چیدمان‌های متفاوت الیاف

کد نمونه	پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه		
	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	کرنش شکست (%)
0P-4G	$215/91 \pm 9/65$	$12/80 \pm 0/30$	$1/76 \pm 0/04$
1P-3G	$120/90 \pm 10/73$	$7/96 \pm 0/50$	$1/34 \pm 0/05$
2P-2G	$96/36 \pm 12/62$	$6/70 \pm 0/25$	$1/70 \pm 0/02$
3P-1G	$81/75 \pm 7/65$	$5/30 \pm 0/15$	$2/13 \pm 0/07$
4P	$61/07 \pm 6/73$	$4/87 \pm 0/06$	$1/68 \pm 0/04$

۴-۳- مقایسه خواص کششی کامپوزیت‌ها

نتایج نشان می‌دهند که در سه دسته کامپوزیت‌های با چیدمان و درصد وزنی یکسان، کامپوزیت‌های حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کربن بیشترین استحکام کششی و مدول الاستیک را دارند. همچنین کامپوزیت‌های شامل الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه به جز در درصد‌های وزنی بالای 80% که نتایج مشابهی با کامپوزیت‌های ساخته شده با الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کولار دارند؛ کمترین استحکام کششی و مدول الاستیک را ارائه می‌دهند (شکل‌های ۴-۵).

مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۶، کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه و کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کربن دارای بیشترین و کمترین کرنش شکست می‌باشند.

۵-۳- نوع شکست کامپوزیت‌ها

در آزمون کشش، حالت شکست به نوع شکست^۱، ناحیه شکست^۲ و منطقه شکست^۳ وابسته می‌باشد. حالت‌های مختلف نوع شکست، ناحیه شکست و

1. Failure Mode

2. Failure Type
3. Failure Area

جدول ۵ حالت شکست در آزمون کشش

نوع شکست	ناحیه شکست	منطقه شکست
زاویه ای	داخل گیره/ تب	پایین
چند لایه شدن	در گیره/ تب	بالا
گیره/ تب	در نزدیکی گیره/ تب	چپ
عرضی	طول سنجه	راست
حالت چندگانه	چند ناحیه ای	وسط
شکاف بلند	مختلف	مختلف
انفجاری	نامعلوم	نامعلوم
سایر		

جدول ۶ حالت شکست در آزمون کشش کامپوزیت‌های حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل

کد نمونه	نوع شکست	ناحیه شکست	منطقه شکست
0P-4C	عرضی	چند ناحیه‌ای	مختلف
1P-3C	عرضی	طول سنجه	بالا
2P-2C	چندگانه	طول سنجه	وسط
3P-1C	زاویه‌ای	طول سنجه	وسط
4P	زاویه‌ای	چند ناحیه‌ای	مختلف

جدول ۷ حالت شکست در آزمون کشش کامپوزیت‌های حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل

کد نمونه	نوع شکست	ناحیه شکست	منطقه شکست
0P-4K	انفجاری	طول سنجه	بالا
1P-3K	انفجاری	طول سنجه	وسط
2P-2K	انفجاری	طول سنجه	وسط
3P-1K	زاویه‌ای	طول سنجه	وسط
4P	زاویه‌ای	چند ناحیه‌ای	مختلف

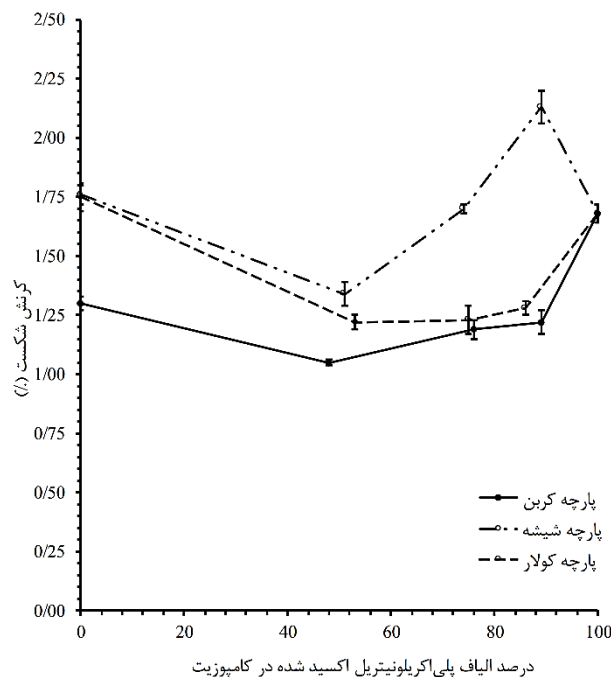
جدول ۸ حالت شکست در آزمون کشش کامپوزیت‌های حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل

کد نمونه	نوع شکست	ناحیه شکست	منطقه شکست
0P-4G	انفجاری	طول سنجه	بالا
1P-3G	چند لایه شدن	طول سنجه	مختلف
2P-2G	چند لایه شدن	طول سنجه	وسط
3P-1G	چندگانه	طول سنجه	وسط
4P	زاویه‌ای	چند ناحیه‌ای	مختلف

۴- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشات نشان داد که حضور پارچه‌های الیاف کربن، کولار و شیشه باعث افزایش و بهبود تنش شکست و مدول الاستیک کامپوزیت زمینه اپوکسی حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده می‌شود. بیشترین تنش شکست و مدول الاستیک را کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه الیاف کربن و پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده داشتند.

هیبرید کردن الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده در کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه کربن و شیشه و کولار باعث افزایش و بهبود کرنش شکست شده است. بیشترین کرنش شکست را کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه داشتند.

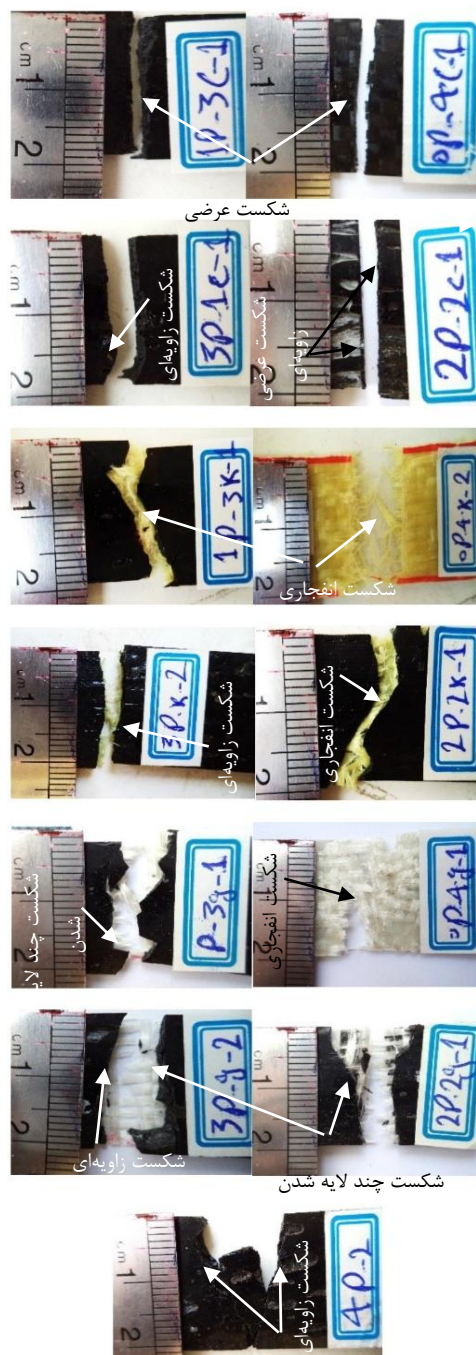


شکل ۶ تغییرات کرنش شکست برحسب درصد الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به کل الیاف تقویت کننده در کامپوزیت.

بررسی شکل ۷ و سطح مقطع شکست کامپوزیت‌های تقویت شده با یکی از الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده، کربن، کولار و شیشه نشان می‌دهد که این کامپوزیت‌ها به ترتیب دارای نوع شکست زاویه‌ای^۱، عرضی^۲، انفجاری^۳ و چند لایه شدن^۴ می‌باشند. با توجه به تحقیقات انجام شده کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن دارای نوع شکست عرضی هستند که نشان می‌دهد که دارای شکست ترد می‌باشند. با افزایش نسبت پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به پارچه الیاف کربن نوع شکست از حالت عرضی به زاویه‌ای تغییر می‌کند (شکل ۷). این بدین معنی است که الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده داکتیلیتی کامپوزیت را بهتر می‌کند که نتایج کرنش شکست این را ثابت می‌کند. کامپوزیت تقویت شده با پارچه الیاف کولار دارای نوع شکست انفجاری می‌باشد (شکل ۷). با افزایش نسبت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به پارچه الیاف کولار نوع شکست از حالت انفجاری به زاویه‌ای تغییر می‌کند. تغییرات نوع شکست با تغییرات کرنش شکست مطابقت دارد. کامپوزیت تقویت شده با چیدمان چهار لایه پارچه الیاف شیشه نوع شکست انفجاری دارد. با اضافه شدن الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده نوع شکست چند لایه شدن غالب می‌شود. با افزایش نسبت این الیاف به پارچه شیشه نوع شکست چندگانه شامل شکست‌های لایه لایه شدن و عرضی غالب می‌شود و در نهایت در کامپوزیت چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده نوع شکست عرضی می‌شود. این نتایج، به طور دقیق مشابه رفتار کرنش شکست کامپوزیت‌های هیبرید شده با الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه الیاف شیشه در شکل ۶ می‌باشد.

1. Angled
2. Lateral
3. Explosive
4. Delamination

- [2] Rahaman, M.S.A. Ismail, A.F. and Mustafa A., "A Review of Heat Treatment on Polyacrylonitrile Fiber," Polymer Degradation and Stability, Vol. 92, No. 8, pp. 1421-1432, 2007.
- [3] Johnson, H.D., "Synthesis-Characterization-Processing and Physical Behavior of Melt-Processible Acrylonitrile Co- and Terpolymers for Carbon Fibers: Effect of Synthetic Variables on Copolymer Structure," MSc Thesis, Virginia University, USA, 2006.
- [4] Arbab, S. and Zeinolebadi, A., "A Procedure For Precise Determination of Thermal Stabilization Reactions in Carbon Fiber Precursors," Polymer Degradation and Stability, Vol. 98, No. 12, pp. 2537-2545, 2013.
- [5] Xue, Y. Liu, J. and Liang, J., "Correlative Study of Critical Reactions in Polyacrylonitrile Based Carbon Fiber Precursors During Thermal-Oxidative Stabilization," Polymer Degradation and Stability, Vol. 98, No. 1, pp. 219-229, 2013.
- [6] Sedghi, A. Eslami Farsani, R. and Shokuhfar, A., "The Effect of Commercial Polyacrylonitrile Fibers Characterizations on the Produced Carbon Fibers Properties," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 198, No. 1-3, pp. 60-67, 2008.
- [7] Badrnezhad, R. and Eslami Farsani, R., "Modeling and Differential Evolution Optimization of PAN Carbon Fiber Production Process," Fibers and Polymers, Vol. 15, No. 6, pp. 1182-1189, 2014.
- [8] Xiaomeng, R. Yuansheng, W. Te, H. and Zhengcai, X., "Analysis and Characterization of Orientation Structure of Pre-oxidized PAN Fibers in High Magnetic Fields," Journal of Wuhan University of Technology Mater. Sci. Ed, Vol. 29, No. 2, pp. 224-228, 2014.
- [9] Karacan, I. and Erdog'an, G., "The Role of Thermal Stabilization on the Structure and Mechanical Properties of Polyacrylonitrile Precursor Fibers," Fibers and Polymers, Vol. 13, No. 7, pp. 855-863, 2012.
- [10] Hou, Y., Sun, T., Wang, H. and Wu, D., "Effect of Heating Rate on the Chemical Reaction during Stabilization of Polyacrylonitrile Fibers," Textile Research Journal, Vol. 78, No. 9, pp. 806-811, 2008.
- [11] SUN, T., Hou, Y. and Wang, H., "Effect of Atmospheres on Stabilization of Polyacrylonitrile Fibers," Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry, Vol. 46, No. 8, pp. 807-815, 2009.
- [12] Horrocks, A. R. and Anand, S. C., "Handbook of Technical Textiles, First Edition, Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 25-31, 2000.
- [13] Smith, W. N., "Flame Retarding Fusion Bonded Non-Woven Fabrics," US Pat. 4, 970, 111, 1990.
- [14] McCarthy, T., "Surface Veil of Oxidized Pan Fiber," US Pat. 2007/0072504A1, 2007.
- [15] Ogle, S. E. and et al, "Bi-layer Nonwoven Fire Resistant Batt and an Associated Method for Manufacturing the Same," US Pat. 2005/0233668A1, 2005.
- [16] Swolfs, Y. Gorbatikh, L. and Verpoest I., "Fibre hybridisation in polymer composites: A review," Composite Part A, Vol. 67, No. 1, pp. 181-200, 2014.
- [17] Gasser, A. Boisse, P. and Hanklar, S., "Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements. 3D simulations versus biaxial tests," Computational Materials Science, Vol. 17, No. 1, pp. 7-20, 2000.
- [18] Kalfon-Cohen, E. Harel, H., Saadon-Yechezkia, M. Timna, K. Zhidkov, T. Weinberg, A. and Marom, G., "Thermal-crosslinked polyacrylonitrile fiber compacts," Polymers for Advanced Technologies, Vol. 21, No. 12, pp. 904-910, 2010.
- [19] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, 08. 01, D3039/D3039M-00, 2002.
- [20] Paiva, J. M. F., Mayer, S. and Rezende, M. C., "Comparison of Tensile Strength of Different Carbon Fabric Reinforced Epoxy Composites," Materials Research, Vol. 9, No. 1, pp. 83-89, 2006.



شکل ۷ سطح مقطع شکست کامپوزیت.

سطح مقطع شکست کامپوزیت ساخته شده از پارچه کربن، کولار، شیشه و الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به ترتیب به صورت شکست عرضی، انفجاری، چند لایه شدن و زاویه‌ای می‌باشد. بررسی سطح مقطع شکست نشان داد که رفتاری مشابه نتایج کرنش شکست دارد. با ترکیب الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه‌های کربن، کولار و شیشه می‌توان کامپوزیت با خواص تنش شکست و مدول الاستیک و کرنش شکست بهینه ساخت.

۵- مراجع

- [1] Schwartz, M., "Encyclopedia of Materials, Parts, and Finishes," Second Edition, Boca Raton, Florida, pp. 8-10, 2002.

